

# Salto y Desplazamiento de una Partícula de Grava Sobre un Lecho Granular

## Jump and Displacement of a Gravel Particle on a Granular Bed

Olivero N. María L.\*, J. Aguirre-Pe Julián, Moncada M. Alix T

Centro de Investigaciones Hidráulicas y Mecánica de Fluidos (CHIDRA), Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela  
\*marial@ula.ve

### Resumen

*En este trabajo se estudia el comportamiento de una partícula sólida en una corriente fluida. Se consideran las fuerzas actuantes sobre la partícula suelta, se toman en cuenta las fuerzas de arrastre, sustentación, fuerzas turbulentas, de entrapamiento de las partículas y la fuerza de gravedad. A partir de cierta posición, cuando la velocidad media del flujo excede un valor crítico y los momentos desestabilizantes son mayores que los estabilizantes, la partícula empieza a desplazarse. La partícula puede iniciar su desplazamiento por un impulso turbulento. El proceso ascensional de la masa gravitacional es de sentido opuesto a la componente correspondiente del peso. Se realizan experiencias para determinar las funciones de desplazamiento propuestas en el modelo teórico de la trayectoria, la longitud de los saltos excede, en general, el salto máximo. Se obtuvieron gráficos adimensionales que permitieron visualizar las posiciones y movimientos de las partículas tanto en la dirección longitudinal como en su elevación.*

**Palabras claves:** Partículas de grava, saltos y desplazamientos de partículas, lecho granular.

### Abstract

*In this paper the behavior of a solid particle in a fluid flow is studied. Acting forces on loose particles are taking into account. Others forces like drag forces, buoyant forces, turbulent forces, trapping forces and gravity forces are taking into consideration. Beyond some position where mean flow velocity exceeds a critical value and unstable moments are greater than the stabilizing ones, the particle starts to move because of a turbulent impulse. The elevation process of the gravitational mass follows an opposite direction to the corresponding weight direction. Experiments are performed in order to find the displacement functions proposed in the theoretical model of the trajectory. The lengths of the jumps generally exceed the maximum clear sediment jump. Dimensionless graphs that allow visualizing the positions and movements of particles both in the longitudinal direction and in its elevation were obtained.*

**Key words:** Gravel particles, jumps and displacements of particles, granular bed.

### 1 Introducción

Cuando se producen condiciones de alta escorrentía, en microcuencas, se genera una acción directa del flujo sobre las partículas sueltas que sobresalen del lecho. Las partículas se desplazan generalmente por rodamiento o mediante saltos de amplitud variable. Entre dos saltos sucesivos o al término del desplazamiento, se puede producir un reposo que depende básicamente del número de Froude densimétrico crítico y de la profundidad del flujo. Alternativamente, la condición crítica se puede presentar como un estado de la partícula en función de dos parámetros apropiados de flujo.

El comportamiento de las partículas del lecho, aisladas

o en grupo, depende de los contenidos de arena, arcilla y agua, que constituyen el flujo. En este trabajo se estableció un flujo mediante la remoción súbita de una pantalla que retiene una matriz de lodo compuesta por diferentes materiales en el lecho.

Para abordar los diferentes esquemas de control en hidráulica fluvial, se han desarrollado procedimientos específicos. Por ejemplo, los problemas relacionados con los efectos de morfología de ríos y la alteración del régimen de transporte se relacionan con los desplazamientos cinemáticos, el régimen de disipación de energía y las alteraciones de los regímenes de transporte.

## 2 Estudios Previos

Las características del movimiento de partículas de arena y grava que inician su movimiento en un flujo de agua, varían según el ángulo de inclinación del lecho. Un lecho positivo puede interrumpirse para que las partículas prosigan su trayectoria en el fluido. Un aspecto trascendente ocurre cuando se construye una trampa prismática de sedimentos y sobre ella se deja fluir la mezcla de sólidos y líquidos, de tal manera que las partículas tengan un desarrollo desde el momento que entran en la trampa hasta que quedan retenidos en el fondo.

La calibración continua permite determinar el rendimiento de recorrido de las partículas, así como su trayectoria individual. Los experimentos realizados (Aguirre-Pe y col., 1994) permiten calibrar el volumen de sedimentos en la trampa, para determinar las relaciones funcionales existentes entre los parámetros hidráulicos y la eficiencia de retención. Los experimentos permitieron concluir que para un mismo ancho de trampa, dado en forma adimensional, como relación de elevación respecto a la profundidad, la trampa presenta una variación de eficiencia considerable respecto al transporte.

En estudios previos (Aguirre-Pe y col., 1990, 1995) se ha introducido el número de Froude densimétrico crítico como parámetro apropiado para describir el transporte en flujos con altas pendientes y grandes rugosidades. Posteriormente, en otros análisis, se consideraron las condiciones de iniciación del movimiento de partículas sueltas en el lecho de canales o ríos con contornos de gran rugosidad y alta pendiente (Aguirre-Pe y col., 2001). Se ha estudiado el efecto de la granulometría en el transporte de sedimentos. Se calibró la función de transporte de sedimentos en función del número de Froude densimétrico de las partículas. Se recomendó dividir el sedimento acarreado en fracciones y determinar el transporte de cada fracción, con lo cual se reduce el error medio de la estimación de transporte (Aguirre-Pe y col., 2002). La diversidad en la longitud de los saltos en partículas con inclinación nula o con succión generada por las trampas de sedimentos induce a justificar la realización de estudios adicionales, experimentales y analíticos, de resistencia, iniciación del movimiento y transporte en flujos torrenciales.

La longitud que recorre una partícula sin recibir sustentación o con sustentación variable depende en buena parte de la reología de las mezclas. El comportamiento mecánico de un material y sus correspondientes relaciones reológicas pueden ser definidos en términos del esfuerzo cortante, el cual corresponde a un desplazamiento relativo. Estos esfuerzos están relacionados con la fuerza total aplicada sobre un disco rotatorio y la velocidad de desplazamiento. Cuando la placa superior se mueve una distancia proporcional a la fuerza aplicada y entonces se detiene, el material es llamado sólido elástico lineal. Si el desplazamiento de la placa superior no es directamente proporcional a la fuerza aplicada se dice que el material es un sólido elástico no lineal (Suárez

2004). De manera simplificada se pueden distinguir los fluidos pseudoplásticos y los dilatantes mediante la relación empírica denominada ley de la potencia de Ostwald y Waele.

El estudio de las fuerzas de sustentación y elevación es variable respecto a tiempos y posiciones características, pero los esquemas cinemáticos ofrecen cierta similitud. En estudios recientes, se ha realizado una amplia serie de experimentos que permiten determinar las longitudes iniciales de recorrido de partículas de grava (Sánchez 2007).

## 3 Desarrollo Analítico

El transporte de sedimentos por el fondo en un río, se ha medido prolijamente exclusivamente tomando muestras con una pequeña cacerola o tobo muestreador. Se ha tratado de realizar mediciones simultáneas de transporte por el lecho en toda la anchura del río o canal. Estos intentos han dado lugar al captador de carga por el fondo denominado muestreador Oak Creek y también East Fork River que consiste en un transportador que genera un vórtice muestreador (Klingeman y col., 1982).

Para facilitar el análisis, se supone que la partícula que salta, Fig. 1, es esférica y de densidad uniforme y que las fuerzas debidas a la aceleración del fluido son de segundo orden.

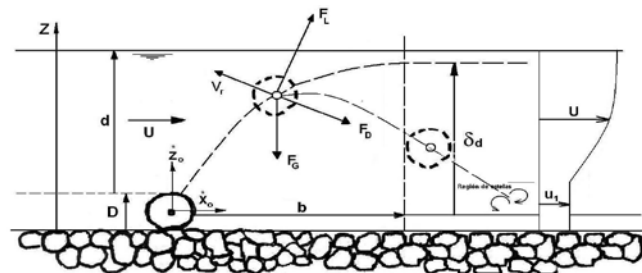


Fig. 1. Esquema de Definición para el Desplazamiento Suspendido de las Partículas

La longitud requerida para alcanzar la elevación de desplazamiento de una partícula se obtiene cuando la distancia horizontal se corresponde con la posición en la que se logra la elevación máxima de la partícula transportada. Según esta hipótesis, las ecuaciones de movimiento pueden escribirse (Van Rijn 1984) como:

$$m \ddot{x} - F_L \left( \frac{\dot{z}}{V_r} \right) - F_D \left( \frac{u - \dot{x}}{V_r} \right) = 0 \quad (1)$$

$$m \ddot{z} - F_L \left( \frac{u - \dot{x}}{V_r} \right) + F_D \left( \frac{\dot{z}}{V_r} \right) + F_G = 0 \quad (2)$$

en las cuales  $F_L$  es la fuerza de sustentación,  $F_D$  la de arrastre y  $F_G$  la de gravedad,  $m$  es la masa de la partícula y

del fluido agregado en ella, y  $V_r$  la velocidad relativa de la partícula, dada por

$$V_r = \left[ (u - \dot{x})^2 + \dot{z}^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

En el análisis del tema (Aguirre-Pe y col., 1990, 1995) han desarrollado cuidadosamente las Ecs. 1, 2 y 3, donde  $V_r$  es la velocidad de la partícula relativa a la velocidad del flujo,  $u$  es la velocidad local del flujo,  $\dot{x}$  y  $\dot{z}$  son las velocidades horizontal y vertical de las partículas, respectivamente, y  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{z}$  son las aceleraciones horizontal y vertical de la partícula.

La masa total de la partícula puede expresarse como

$$m = \frac{1}{6} (\rho_s + \alpha_m \rho) \pi D^3 \quad (4)$$

donde  $\alpha_m$  es el coeficiente de masa agregada,  $\rho_s$  y  $\rho$  son las densidades de las componentes sólida y líquida, respectivamente, y  $D$  es el diámetro de la partícula. La fuerza de arrastre puede expresarse por

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho \frac{\pi D^2}{4} V_r^2 \quad (5)$$

donde  $C_D$  es el coeficiente de arrastre. La fuerza de sustentación se genera por el gradiente de velocidades presente en el flujo y por el movimiento de rotación de las partículas (efecto Magnus).

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho \frac{\pi D^2}{4} V_r^2 \quad (6)$$

donde  $C_L$  es el coeficiente de sustentación. La fuerza debida al peso sumergido está dada por

$$F_G = \frac{\pi}{6} D^3 (\rho_s - \rho) g \quad (7)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Para resolver las Ecs. 1, 2 y 3 deben conocerse las velocidades iniciales, horizontales y verticales de la partícula, así como la distribución de velocidades propia del flujo. La definición de estos parámetros implica la inclusión de valores experimentales en la solución numérica de las ecuaciones mencionadas. Desafortunadamente, aún no es posible una solución exacta pero una aproximación experimental que supone nulas tanto la aceleración horizontal como la vertical permite formular que la distancia máxima que puede tener el salto de una partícula se logra cuando en el proceso de ascenso ella llega hasta la superficie libre.

#### 4 Mezclas de Material Utilizadas

La selección del grupo de matrices a ensayar se hizo partiendo de resultados obtenidos previamente (Suárez 2004), en los cuales se hizo su selección partiendo de la

viabilidad que pudiesen presentar para la medición de la viscosidad y esfuerzo cortante, para evitar errores en la medición a causa de sedimentación de las partículas de arena y al resbalamiento debido al espaciamiento de la mezcla. Haciendo ensayos de sedimentación descartó matrices cuyo tiempo de sedimentación de las partículas fuese inmediato así como aquellas demasiado espesas que no fluían en un tubo de ensayo.

El desarrollo experimental realizado en este trabajo, cubrió el campo de la matriz de concentraciones, mostrado en la Fig. 2, con pesos específicos dados en la Fig. 3.

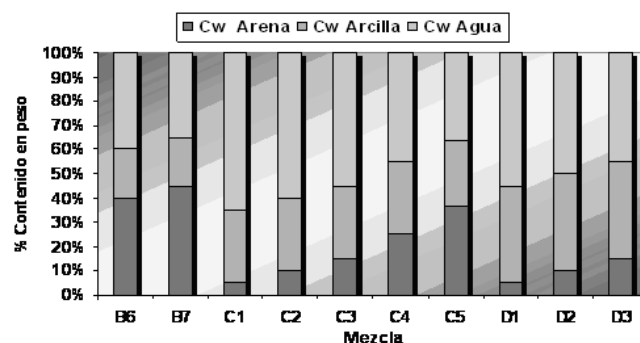


Fig. 2. Matriz de Distribución de Componentes

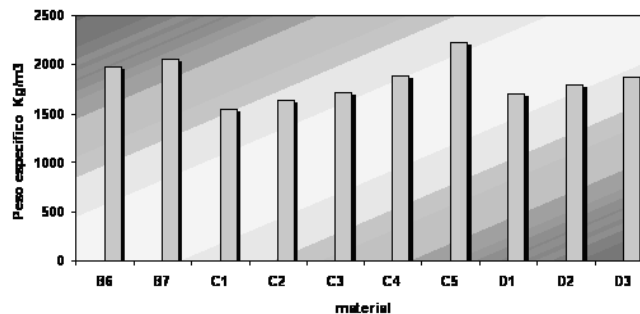


Fig. 3. Pesos Específicos de las Mezclas Utilizadas

La arena utilizada era una muestra bien gradada con un coeficiente de curvatura  $C_c = 1.03$  y un coeficiente de uniformidad  $C_u = 4.11$ . La arcilla utilizada fue una arcilla comercial de uso artesanal, con un límite líquido  $LL = 46.50$ , límite plástico  $LP = 24.80$  y un índice plástico  $IP = 21.70$ , con un pasante del tamiz  $N^\circ 200$  de  $28.72\%$ .

Las concentraciones en peso  $C_w$  de la arena, arcilla y agua para cada matriz se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Concentraciones en Peso de la Arena, Arcilla y Agua para cada Matriz

	B6	B7	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3
$C_w$ arena	0.40	0.45	0.05	0.10	0.15	0.25	0.30	0.05	0.10	0.15
$C_w$ arcilla	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40
$C_w$ agua	0.40	0.35	0.65	0.60	0.55	0.45	0.40	0.55	0.50	0.45

El comportamiento de partículas en flujos viscosos

compuestos por la mezcla de arcilla y arena en agua es particularmente complejo, pues depende tanto del tamaño medio de los granos como de la distribución granulométrica de las arcillas y las arenas. Para analizar el comportamiento del material granular se realizaron diez experimentos. Las arcillas se hicieron variar entre 0.20 y 0.40 en concentración en peso. Las arenas entre 0.05 y 0.45 y el agua entre 0.35 y 0.65. Las diferentes sustancias combinadas constituyeron las diez matrices a ensayar. La matriz B7 presentó mayor resistencia al movimiento y la matriz D1 ofreció la mayor fluidez.

## 5 Procedimiento Experimental

Para el procedimiento experimental, se contó con un canal de vidrio de 4.00 m de longitud, 10 cm de ancho y 15 cm de altura, como se muestra en la Fig. 4.



Fig. 4. Equipo Experimental

Uno de los costados del canal fue rayado con líneas oscuras paralelas y perpendiculares al lecho, formando cuadrículas de  $1 \text{ cm}^2$  presentado en la Fig. 5. Esto último, permitió mantener un registro continuo del frente de onda, así como localizar la traza superficial descrita. Al canal se le adaptó una compuerta plana de superficie lisa que retiene la matriz de barro aguas arriba. La compuerta se remueve verticalmente, liberando la mezcla almacenada de arena y arcilla saturada en agua.

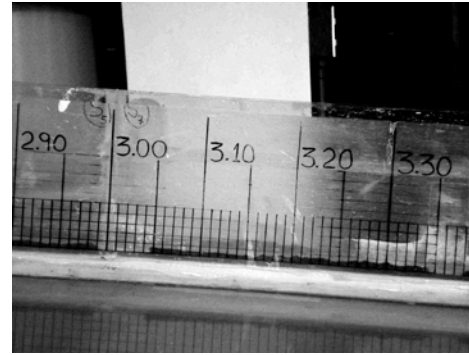


Fig. 5. Vista Lateral del Canal con su Escala

Se ubicó una partícula de grava a un metro de la compuerta de retención, se liberó la mezcla de manera súbita, y se midió con una cámara de video con velocidad de 60 cuadros por segundo el movimiento de la partícula. Posteriormente, con la escala de la pared del canal y el video se midió el tiempo en el que la partícula pasaba por los puntos de la escala, obteniéndose el tiempo de desplazamiento para los lodos ensayados.

## 6 Resultados

A partir de la información experimental se realizaron gráficos adimensionales que permitieran la visualización de las posiciones y movimiento de las partículas tanto en su posición longitudinal como en su elevación.

En la Fig. 6 se observa que las matriz B6 presenta partículas con grandes longitudes de recorrido  $X/x$ , a excepción del recorrido de 1.55 para  $S = 0.06$ .

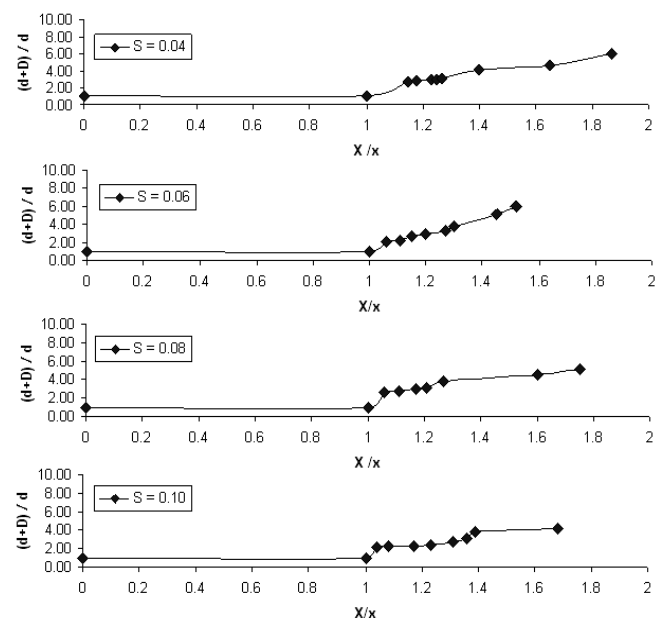


Fig. 6. Perfiles Correspondientes a la Matriz B6  
En la Fig. 6,  $x$  es la distancia inicial de la partícula con

respecto a la compuerta, la cual se mantuvo constante e igual a 1 m,  $X$  es la distancia total recorrida por la partícula respecto a la compuerta, una vez que ha iniciado el movimiento,  $d$  es la profundidad del flujo medida desde la partícula y  $D$  es el diámetro de la partícula.

Además, se obtuvo que el material B7 presenta longitudes de recorrido cercanas a 1.60. El material C1 presenta longitudes de recorrido próximas a 1.80 excepto para  $S = 0.10$ , para la cual el recorrido fue de 1.4. Las partículas de las matrices C2 muestran una elevación de aproximadamente  $(d + D)/d = 5.0$ . Las partículas de las matrices se sobreelevan alcanzando, para una pendiente de  $S = 0.08$ , una elevación cercana a 6 y, para  $S = 0.06$ , ligeramente inferior a 8.0.

La matriz C1 presenta una elevación aproximada de 6 para  $S = 0.04$  y alcanza una elevación  $(d + D)/d \approx 9.0$  con una distancia de recorrido de 1.9, para  $S = 0.06$ . Para las pendientes de 0.04 y 0.08 el comportamiento de las partículas de la matriz C1 es regular. Las partículas de la matriz C2 también tienen un comportamiento regular para las pendientes 0.04, 0.08 y 0.10. Para la pendiente  $S = 0.06$  se produce un salto acelerado de la partícula a partir de  $X/x$  igual a 1.6.

Como se ilustra en la Fig. 7, los materiales de la matriz C3 presentan elevaciones cercanas a 8, excepto para las pendientes  $S = 0.08$  y 0.10. La longitud de recorrido es  $X/x \approx 1.70$ , excepto para  $S = 0.06$  en la cual es 1.5. Para las pendientes 0.06, 0.08 y 0.10, las matrices C3 muestran un recorrido casi uniforme.

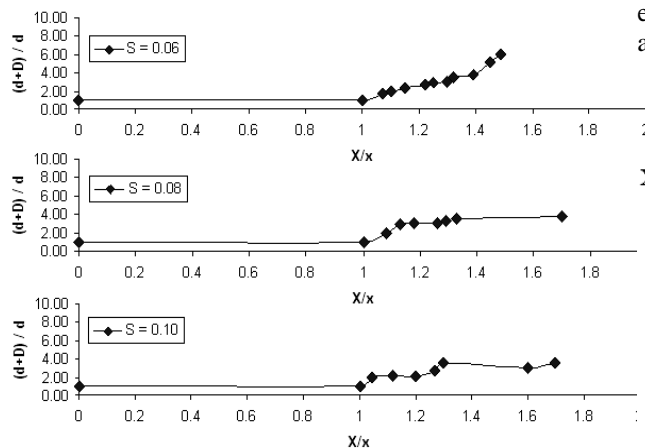


Fig. 7. Perfiles Correspondientes a la Matriz C3

Se obtuvo que los materiales de la matriz C4 presentan una condición de recorrido casi uniforme excepto para la pendiente  $S = 0.06$  en que la elevación de la partícula es cercana a 10. Se encontró que en el material C5 con pendiente 0.06, la elevación de la partícula es también cercana a

10.

Las partículas de la matriz D1 tienen un recorrido casi uniforme mientras que las partículas de la matriz D2 avanzan a saltos en trechos largos, como se muestra en la Fig. 8

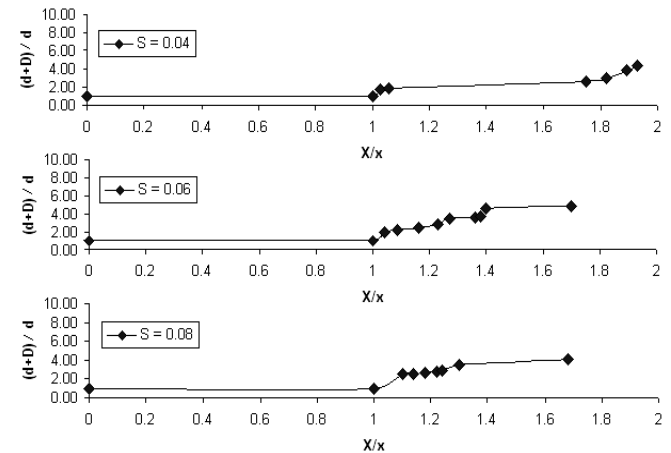
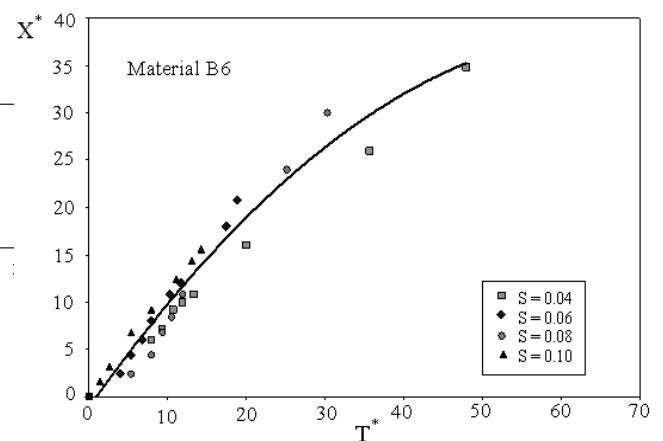


Fig. 8. Perfiles Correspondientes a la Matriz D2

Los materiales de la matriz D3 presentan un recorrido casi uniforme con saltos longitudinales registrados de aproximadamente  $X/x = 1.7$ . Se presenta una alta elevación  $(d + D)/d$  cercana a 8 para  $S = 0.06$ .

En la Fig. 9 se presentan gráficos adimensionales de iniciación del movimiento, correspondientes a las matrices B6 y B7, donde  $X^* = X/h_0$  y  $T^* = t(g/h_0)^{1/2}$ , en las cuales  $h_0$  es la altura inicial del flujo y  $t$  es el tiempo. Se observa que ambas mezclas tienen un comportamiento similar.



(a)

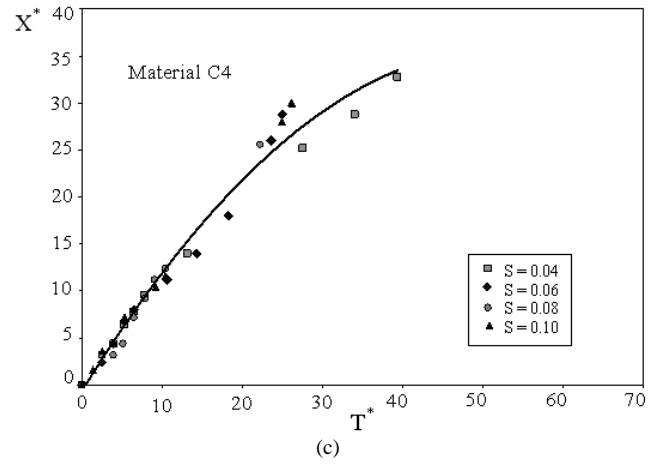
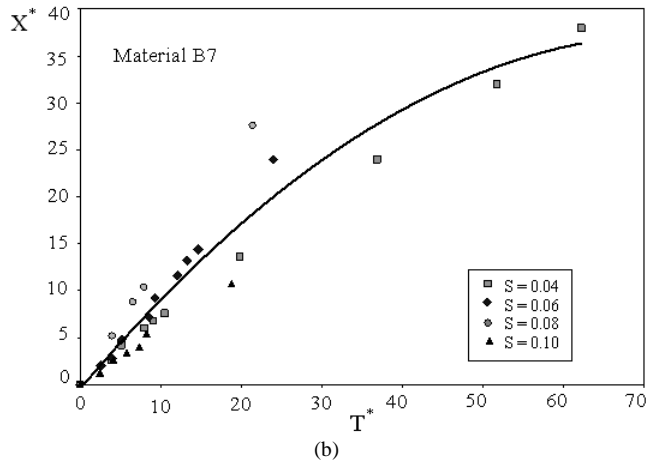


Fig. 9. Variación de la Posición de las Partículas con el Tiempo

En la Fig. 10 se presentan los valores experimentales de  $X^*$  y  $T^*$  correspondientes a las matrices C1, C3, C4 y C5. Se observa que, en este caso, se alcanza el mismo recorrido en un tiempo menor.

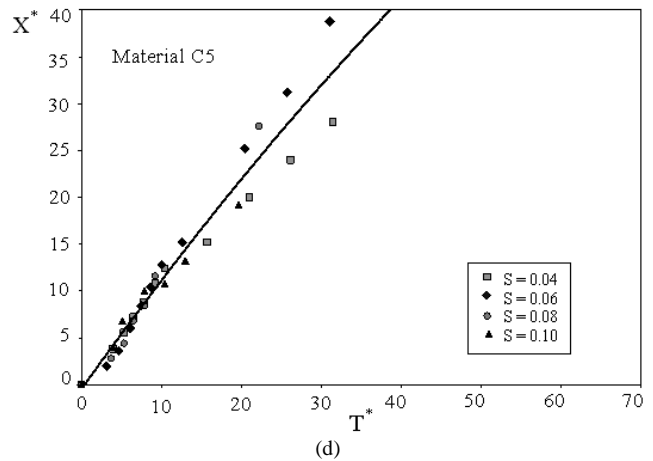
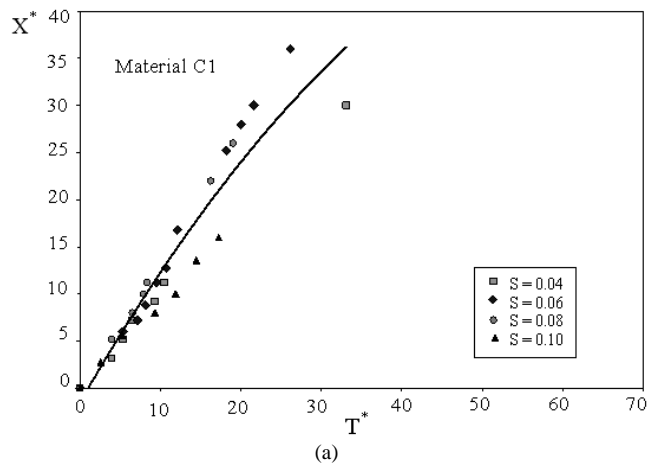
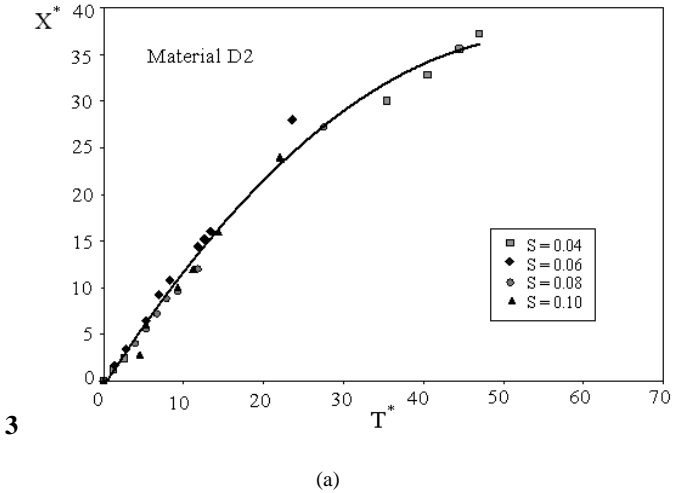
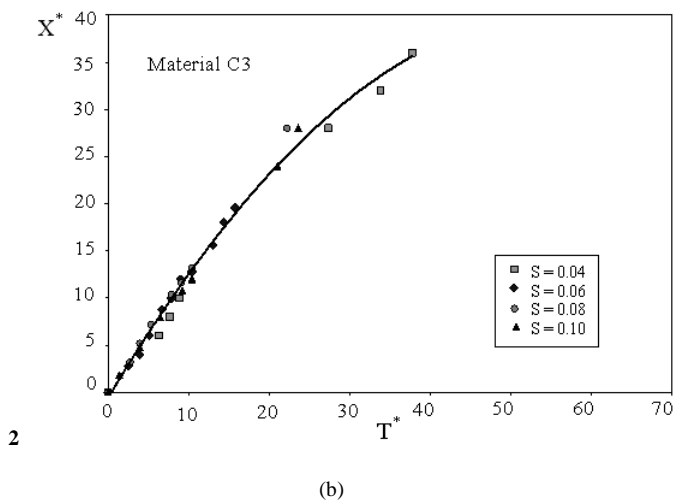


Fig. 10. Variación de la Posición de las Partículas con el Tiempo



Se observa en la Figura 10d que existe una tendencia lineal entre los parámetros  $X^*$  y  $T^*$  indicando una variación en el comportamiento antes descrito.

En la Fig. 11 se ilustran los valores experimentales de  $X^*$  y  $T^*$  para las matrices D2 y D3.



2

3

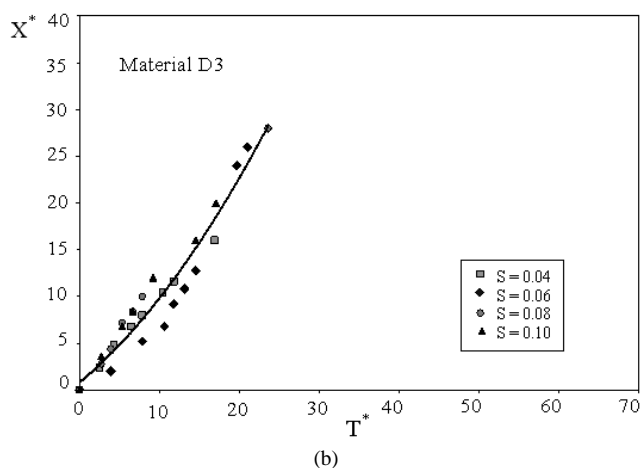


Fig. 11. Variación de la Posición de las Partículas con el Tiempo

Se observa que, en este caso, el comportamiento de las mezclas es diferente. Las partículas de la matriz D3 recorren la misma distancia en un menor tiempo, indicando mayor rapidez de movimiento. Se encontró que la matriz D1 presenta el mismo comportamiento que la matriz D3.

## 7 Conclusiones

Se ha estructurado un canal de 4.5 m de longitud y 0.10 m de ancho y pendiente nula, para generar movimiento de partículas individuales de arena y grava, arrastradas por agua pura con sección de entrada hidrodinámica. Se ha encontrado que las partículas presentan mayores desplazamientos que los previstos por resultados analíticos sencillos, y por estudios previos de captación gradual longitudinal.

Los desplazamientos medidos horizontal y vertical son de similar orden de magnitud en el rango estudiado. La longitud de recorrido  $X/x$  varió entre 1 y 1.9 y la elevación  $(d + D)/d$  entre 1 y 10. La iniciación del movimiento ocurre siguiendo una tendencia parabólica en la mayoría de los casos, pero en unos pocos tiende a ser lineal.

## 8 Agradecimiento

Los autores expresan su agradecimiento al “Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico” de la Universidad de los Andes por su apoyo financiero a través de Programa CVI-ADG-I-07-95C.

## Referencias

- Aguirre-Pe J, Fuentes R, 1990, Resistance to flow in steep rough stream, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 116, No. 11, pp. 1374 – 1387.
- Aguirre-Pe J, Fuentes R, 1995, Stability and weak motion of riprap at a channel bed, in river, coastal and shoreline protection, Edit. by Thorne, Abt, Barends, Maynard and Pilarezyk, John Wiley and Sons, pp. 77 – 92.
- Aguirre-Pe J, Olivero ML, Naime W, Cordero G, 1994, Captación de sedimentos gruesos, *Memorias del XVI Con-*

greso Latinoamericano de Hidráulica, AIIH, Vol. 5, pp. 13 – 23, Santiago de Chile.

Aguirre-Pe J, Olivero ML, Moncada AT, 2001, Efecto del número de Froude densimétrico en el transporte de sedimentos, *Revista Ciencia e Ingeniería*, Vol. 22, No. 2, pp. 33 – 38.

Aguirre-Pe J, Moncada AT, Olivero ML, 2002, Efecto de la granulometría en el transporte de sedimentos, *Revista Ciencia e Ingeniería*, Vol. 23, No. 1, pp. 3-7.

Klingeman PC, Emmett WW, 1982, Gravel bed load transport processes, Cap. 7 de *Gravel – bed Rivers*, editado por R. H. Hey, J. C. Bathurs y C. R. Thorne, John Wiley and Sons Ltd., pp. 141 – 179.

Sánchez YL, 2007, Arrastre de granos de grava en un canal, producido por una corriente de arena y arcilla, Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, p. 167.

Suárez AG, 2004, Movimientos de masas en canales inclinados usando mezclas de arcilla, arena y agua, Tesis para optar al Título de Magíster Scientiae en Obras Hidráulicas, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, p. 189.

Van Rijn LC, 1984, Sediment transport, Part I: Bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 110, N° 10, pp. 1431-1456.

**Recibido:** 07 de octubre de 2014

**Aceptado:** 27 de agosto de 2015

**Olivero N. María L.:** Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Civil, Departamento de Hidráulica y Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, e-mail: marial@ula.ve.

**Aguirre-Pe Julián.:** Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Civil, Departamento de Hidráulica y Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, e-mail: aguirrej@ula.ve.

**Moncada M. Alix T.:** Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Civil, Departamento de Hidráulica y Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, e-mail: alix@ula.ve.

